BOLETÍN TÉCNICO NO. 4

RESISTENCIA DE GEOPIER A CARGA LATERAL

Este Boletín Técnico discute el comportamiento de sistemas de cimentaciones superficiales soportadas por elementos Geopier sujetos a cargas laterales. Las cargas laterales son inducidas a los sistemas de cimentaciones por viento, eventos sísmicos, o por presiones laterales de tierra. Las cimentaciones superficiales soportadas por Geopier proveen resistencia a las cargas laterales mediante mecanismos que son idénticos a aquellos aplicables a las zapatas superficiales convencionales. Estos mecanismos incluyen el empuje de tierra pasivo adyacente a la zapata, y la resistencia al deslizamiento a lo largo de la base de la zapata. Sin embargo, debido a la alta concentración de esfuerzos en los elementos Geopier, y al alto ángulo de fricción del agregado Geopier, se logra mayor resistencia en comparación a una zapata soportada por suelo no reforzado por elementos Geopier. Este Boletín Técnico describe la demanda de cargas laterales en las estructuras, los métodos usados para el diseño de zapatas soportadas por Geopier para resistir cargas laterales, y los resultados de pruebas de cargas laterales a zapatas en escala real.

1. TRASFONDO: DEMANDA DE CARGAS LATERALES

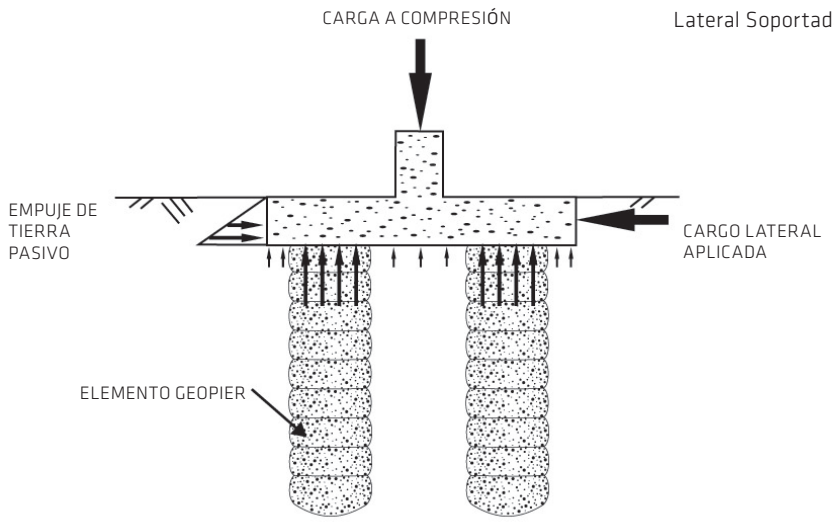
La demanda de cargas laterales en estructuras, muros de contención, y edificaciones, es generada por el empuje horizontal de tierra, el viento, y los terremotos. Las cargas laterales son transmitidas a través de una estructura y resistida por el sistema de cimentación. Las cimentaciones superficiales soportadas por Geopier resisten las cargas laterales con mecanismos idénticos a aquellos aplicables a zapatas superficiales convencionales (Figura 1):

- Empuje de tierra pasivo adyacente a la zapata.
- Resistencia contra deslizamiento en la base a lo largo del fondo de la zapata.

La combinación de la concentración de esfuerzos en los elementos rígidos Geopier y el alto ángulo de fricción interna del agregado del elemento Geopier, permiten el desarrollo de una resistencia lateral significativamente mayor a la desarrollada por zapatas sin soporte de elementos Geopier.

GEOPIER®
Tensar.

Figura 1.
Resistencia de Zapata a Carga Lateral Soportada por Geopier



2. CONSTRUCCIÓN DE GEOPIER

La construcción de los elementos Geopier es descrita en el Manual de Referencia Geopier (Fox and Cowell 1998). Los elementos Geopier son construidos perforando un cierto volumen de suelo compresible para crear una cavidad, y así apisonar en capas delgadas el agregado selecto dentro de la cavidad. La construcción de los elementos Geopier da como resultado una columna de agregado muy denso, donde el agregado tiende a dilatarse cuando es sometido a esfuerzos de corte. Este proceso constructivo permite tener un alto nivel de confianza en el ángulo de fricción de diseño usado para el agregado apisonado de Geopier.

3. RESISTENCIA AL CORTANTE DE GEOPIER

Pruebas de corte directo a escala real en elementos Geopier de 30 pulgadas de diámetro, así como pruebas triaxiales de laboratorio conducidas en muestras reconstituidas, demostraron que el ángulo de fricción interna para el agregado Geopier se encuentra en el rango de 49 a 52 grados, dependiendo de la granulometría. Los resultados obtenidos en las pruebas de corte directo a escala real, sobre los elementos Geopier (Fox y Cowell 1998), son presentadas en la Figura 2. Los elementos Geopier fueron sometidos a prueba usando material bien graduado tipo base, y grava #57.

Se realizaron pruebas de laboratorio a pequeña escala tipo triaxiales en la Universidad Estatal de Iowa sobre muestras reconstituidas de agregado Geopier bien graduado (White 2001), compactado a densidades consistentes a aquellas obtenidas de elementos Geopier instalados. Los resultados de las pruebas, presentados en la Figura 3, indican un ángulo de fricción interna de 51 grados. Los altos ángulos de fricción obtenidos en campo y mediante pruebas de laboratorio, se atribuyen a la alta densidad y al comportamiento de dilatación que el agregado produce durante la alta energía de apisonamiento de la grava triturada usada en los elementos Geopier.

Figura 2.
Resultados de Prueba de Corte Directo a
Escala Real en el Tope de Elementos Geopier

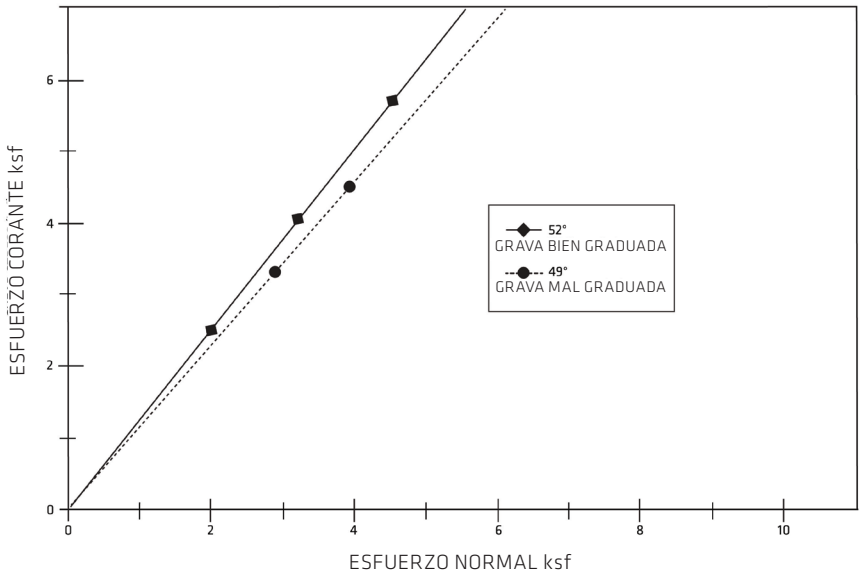
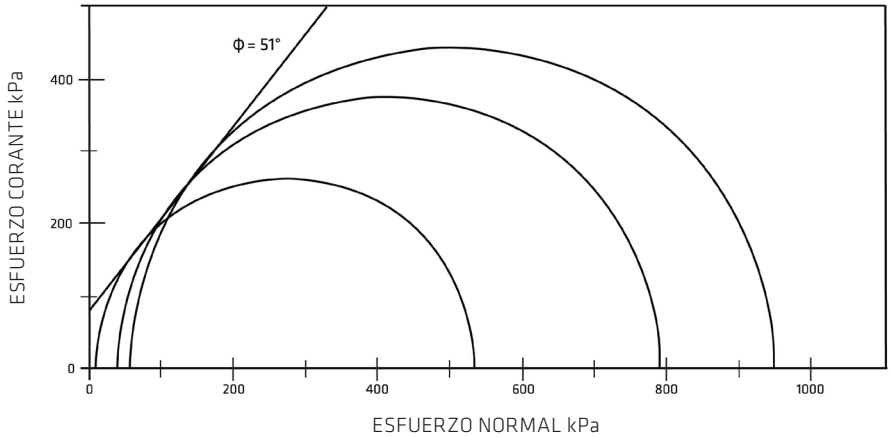


Figura 3.
Resultados de Prueba Triaxial
en Agregado Geopier Apisonado



4. RESITENCIA A CARGA LATERAL

Las cargas laterales que son transmitidas a las cimentaciones superficiales son resistidas mediante resistencia al deslizamiento a lo largo de la base de la zapata y por el empuje pasivo del suelo que se desarrolla al frente de la zapata al ser empujada hacia el suelo adyacente (Figura 4). Aunque una resistencia adicional a las cargas laterales es obtenida por la flexión de las barras verticales en los elementos que contienen anclajes a tensión, esta resistencia adicional es baja en comparación con otras resistencias a bajos valores de deflexión lateral. Predicciones teóricas indican que el componente de resistencia a carga lateral obtenido por resistencia al deslizamiento es típicamente mucho mayor que el componente obtenido por empuje pasivo.

4.1 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO EN LA BASE DE ZAPATAS SOPORTADAS POR GEOPIER

Como se presenta en la Figura 4, la resistencia al deslizamiento en la base de zapatas soportadas por Geopier se puede dividir en dos componentes: 1) resistencia al deslizamiento entre la zapata y el tope de los elementos Geopier y 2) resistencia al desplazamiento entre la zapata y el suelo matriz.

4.1.1 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO APORTADA POR ELEMENTOS GEOPIER

La resistencia al deslizamiento aportada por los elementos Geopier (F_g) es calculada como el producto del esfuerzo normal en el elemento (q_g), la tangente del ángulo de fricción interna del elemento (ϕ'_g), y el área transversal de los elementos Geopier (A_g):

$$F_g = q_g \tan \phi'_g A_g, \qquad \text{Ec. 1.}$$

Para zapatas construidas de concreto colado en sitio directamente sobre el tope de los elementos Geopier, no es necesario utilizar un ángulo de fricción interna reducido debido a la áspera interface entre el concreto y el agregado angular.

Como se describe en la literatura (Lawton y Fox 1994, Lawton et al. 1994, Fox y Cowell 1998, Wissmann et al. 2000, Wissmann y Fox 2000), el esfuerzo normal sobre los elementos Geopier depende de la presión promedio ejercida por la zapata (q), la relación de rigidez (R_s) entre los elementos Geopier y el suelo matriz, y la relación de la suma del área de la sección transversal de los elementos Geopier y el suelo matriz (Fox y Cowell, 1988):

$$q_g = \{qR_s/[R_aR_s + 1\text{-}Ra]\}. \qquad \text{Ec. 2.}$$

El esfuerzo sobre los elementos Geopier es significativamente mayor que el esfuerzo sobre la matriz de suelo adyacente debido a que los elementos Geopier presentan mayor rigidez que el suelo matriz. Esta relación de rigidez (R_s) fue presentada por Lawton (2000) en un rango de entre 30 y 45 en un sitio de suelo blando en la ciudad de Salt Lake, Utah. Como resultado de los altos esfuerzos normales y el alto ángulo de fricción interna presentado por el agregado apisonado Geopier, la mayoría de la resistencia contra cargas laterales obtenida en zapatas soportadas por Geopier, es atribuida a la resistencia al deslizamiento en el tope de los elementos Geopier.

4.1.2 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO APORTADA POR EL SUELO MATRIZ

La resistencia al deslizamiento aportada por el suelo matriz (F_m) depende del producto del esfuerzo normal en el suelo matriz (q_s), la tangente del ángulo de fricción interna del suelo matriz (ϕ'_m), el área del suelo matriz (A_m) y la cohesión del suelo matriz (c_m):

$$F_m = q_s \tan \phi'_m A_m, \qquad \text{Ec. 3.}$$

El área del suelo matriz es la diferencia entre la huella de la cimentación y la suma de la sección transversal de los elementos Geopier. Para zapatas construidas de concreto colado en sitio directamente sobre el tope de los elementos Geopier, no se requiere utilizar el ángulo de fricción (ϕ'_m) interna reducido debido a la áspera interface entre el concreto y el suelo. El esfuerzo en el suelo matriz es calculado como el esfuerzo en los elementos Geopier dividido por la relación de rigidez entre los elementos Geopier y el suelo matriz (Fox y Cowell 1998):

$$q_s = q_g / R_s, \qquad \text{Ec. 4.}$$

4.1.3 RESISTENCIA TOTAL

La resistencia total contra deslizamiento a lo largo de la base de la zapata (F_t) es calculada sumando la resistencia contra deslizamiento en el tope de los elementos (F_g) y la resistencia contra deslizamiento en la interface de la cimentación y el suelo matriz (F_m):

$$F_t = F_g + F_m, \qquad \text{Ec. 5.}$$

4.1.4 COEFICIENTE UNITARIO DE FRICCIÓN COMPUESTO

El coeficiente unitario de fricción permisible (f_{all}) es frecuentemente usado por ingenieros estructurales para determinar la resistencia de las zapatas a las cargas laterales. El coeficiente unitario de fricción permisible para cualquier zapata es simplemente

calculado como la relación de la resistencia lateral por deslizamiento permisible (F_{all}) y la carga muerta aplicada a la zapata (P):

$$f_{all} = F_{all} / P, \qquad \text{Ec. 6.}$$

donde F_{all} es calculado como el cociente de la resistencia última al deslizamiento (F_t) y de un factor de seguridad (FS):

$$F_{all} = F_t / FS \qquad \text{Ec. 7.}$$

Un factor de seguridad de 1.5 a 2 se utiliza típicamente en conjunto con la Ecuación 7. Cuando se consideran cargas dinámicas , la resistencia a la carga permisible es típicamente incrementada por un factor de 1/3 o más.

El coeficiente unitario de fricción compuesto para zapatas soportadas por Geopier puede ser expresado combinando las Ecuaciones 1 y 7:

$$f_{all} = [\{R_s R_a \tan \phi'_g + (1-R_a) \tan \phi'_m\} / \{R_a R_s + 1 - R_a\}] / FS, \qquad \text{Ec. 8.}$$

Los valores típicos de f_{all} para varios tipos de suelo son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1:
Valores Típicos del Coeficiente Unitario de Fricción Compuesto

SUELO	ϕ Típico	f_{all}*
ARENA Y GRAVA	28° - 45°	0.52 -0.55
LIMO Y ARCILLA	20° - 30°	0.51 -0.52

*Valores calculados para R_s = 15, R_a = 33%, and FS =2

4.2 EMPUJE DE TIERRA PASIVO

El empuje de tierra pasivo se desarrolla dentro del suelo matriz al frente de las zapatas mientras las zapatas empujan lateralmente el suelo adyacente. La fuerza pasiva (F_p) que resiste el movimiento lateral depende del ancho de la cimentación (B), peso unitario del suelo (γ), la profundidad de desplante de la zapata(D_f), el coeficiente de empuje de tierra pasivo de Rankine (K_p) y la cohesión del suelo matriz (c_m) como se presenta en la Ecuación 9 (Terzaghi y Peck 1967):

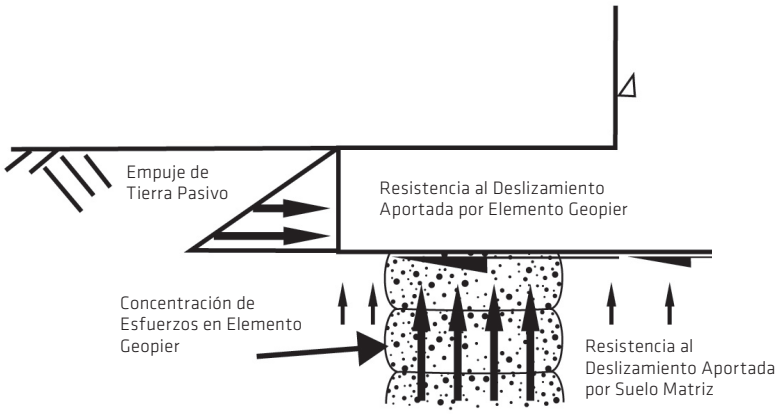
$$F_p = B\, K_p\, \gamma\, D_f^2/2 + 2\, c \sqrt{K_p}\, B\, D_f, \qquad \text{Ec. 9.}$$

donde el coeficiente de empuje pasivo de Rankine depende del ángulo de fricción interna del suelo matriz adyacente (ϕ'_m):

$$K_p = \tan^2 (45 + \phi'_m/2) / FS. \qquad \text{Ec. 10.}$$

Un factor de seguridad (FS) de 2.0 es típicamente usado en conjunto con la ecuación 10 para evitar deformaciones laterales considerables. Cuando se consideradan cargas dinámicas, la resistencia a la carga permisible es típicamente incrementada por un factor de 1/3 o más.

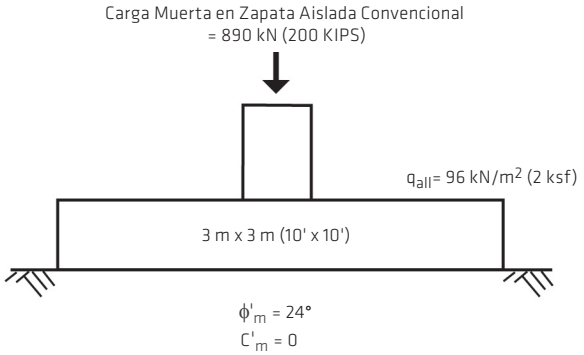
Figura 4.
Resistencia Lateral a lo Largo del Fondo de Zapata



5. EJEMPLOS DE CÁLCULO

Las Figuras 5a y 5b presentan ejemplos de cálculos para estimar la resistencia al deslizamiento de dos zapatas, una soportada por suelo matriz no reforzado y otra soportada por elementos Geopier, respectivamente. Ambas zapatas son sujetas a una carga muerta de 200 kips. Para simplificar el procedimiento del ejemplo de cálculo, se asume conservadoramente que el nivel de desplante de ambas zapatas se encuentra por encima del nivel de terreno (no se desarrollará resistencia de empuje pasivo). Para la misma carga vertical, la zapata soportada por Geopier resiste 505 kN (permisible), comparada con tan solo 200 kN para el suelo no reforzado. La zapata soportada por Geopier resiste más de dos veces y media la carga lateral aun cuando el área de la huella de la zapata es tan solo el 40 por ciento del área de la huella de la zapata no soportada por elementos Geopier.

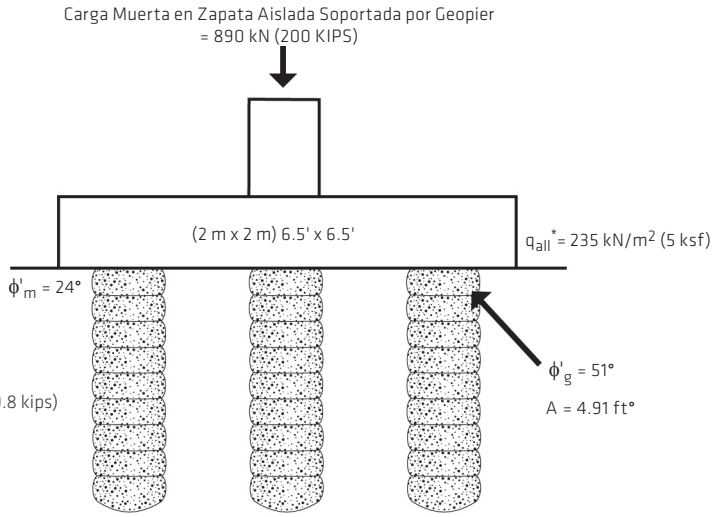
Figura 5a
Ejemplo de Resistencia al Deslizamiento Para Zapata Soportada por Suelo No-Reforzado



Cálculos

q = 890 kN / (3 m x 3 m) = 99 kN/m² (2000 psf)
tan ϕ'_m = tan 24° = 0.445
F_m = 99 kN/m² (0.445)(3 m x 3 m) = 396 kN (89,000 lbs)
F_{all} = 396 kN / 2 = 198 kN (44.5 kips)
f_{all} = 198 kN / 890 kN = 0.22

Figura 5b
Ejemplo de Resistencia al Deslizamiento Para Zapata Soportada con Geopier



Cálculos

q = 890 kN / (2 m x 2 m) = 223 kN/m² (4,730 psf)
R_a = 3 (0.46 m²) / (2 m x 2 m) = 0.35
R_s = 15 (Típico)
q_g = 223 kN/m² {15 / (15 x 0.35 + 1 - 0.35) = 567 kN/m² (12 ksf)}
q_s = 567 kN/m² / 15 = 37.8 kN/m² (800 psf)
F_m = 37.8 kN/m² (tan 24){(2 m x 2 m) - (3 x 0.46 m²)}= 44.1 kN (9.8 kips)
F_t = 44.1 kN + 966 kN = 1010 kN (228.1 kips)
F_{all} = 1010 kN / 2.0= 505 kN (114.1 kips)
f_{all} = 505 kN / 890 kN = 0.57

* q_{all} es mayor para zapatas soportadas por Geopier que para zapatas convencionales debido al incremento en resistencia al corte aportado por los elementos Geopier.

6. PRUEBA A ESCALA REAL DE CARGA LATERAL EN ZAPATA

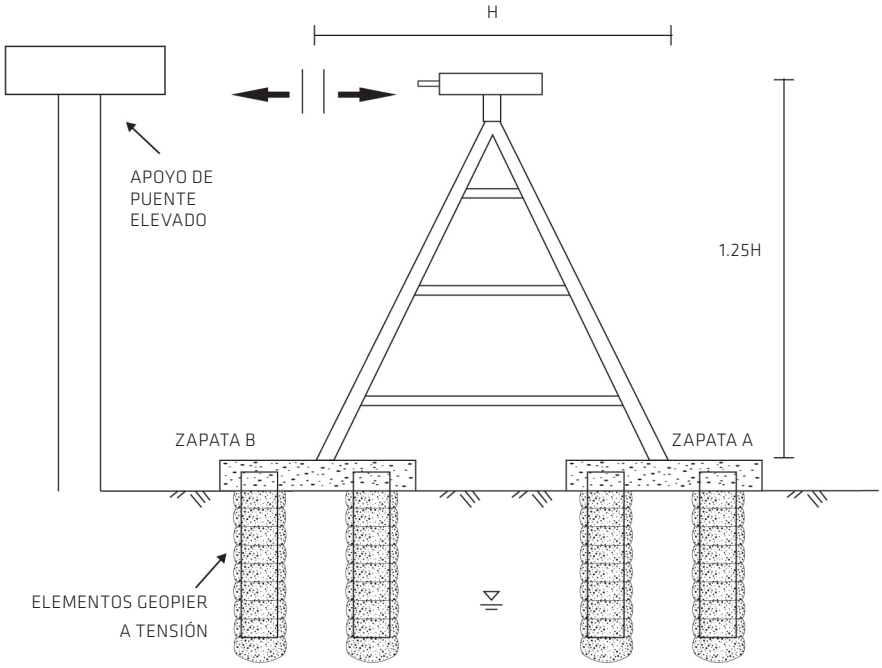
En 1998, investigadores de la Universidad de Utah bajo el auspicio del Departamento de Transporte de Utah (Utah DOT) probaron un apoyo de puente elevado para evaluar el comportamiento de apoyos de puentes a cargas sísmicas simuladas inducidas por un terremoto de M_w 7.5 (Lawton 2000). La prueba requirió la construcción de un marco de reacción sujeto a grandes cargas cíclicas laterales. El marco de reacción fue soportado por elementos Geopier. El programa de prueba proveyó a los investigadores una oportunidad de verificar los mecanismos de resistencia a las cargas mencionados en este boletín técnico.

6.1 TRANSFONDO DE PRUEBA DE CARGA LATERAL

El gran marco de reacción, presentado en la Figura 6, fue requerido para la aplicación de cargas cíclicas al apoyo de puente elevado. El marco de reacción incorporó dos zapatas apoyadas por elementos Geopier. Debido a que las zapatas fueron desplantadas a nivel de terreno sin ser empotradas, no desarrollaron resistencia por empuje de tierra pasivo y la resistencia lateral fue desarrollada exclusivamente por deslizamiento en la base de cada zapata.

Cada una de las zapatas de los marcos de reacción midió 7.47m (24.5 pies) de largo por 2.54m (8.25 pies) de ancho y 1.14m (3.75 pies) de espesor. Diez elementos Geopier de 0.91m (36 pulgadas) de diámetro, fueron perforados a 4.6m (15 pies) de profundidad y equipados con anclajes a tensión que fueron usados para soportar cada una de las zapatas de los marcos de reacción. Las condiciones subyacentes de las zapatas consistieron en depósitos lacustres constituidos de limos y arcillas de una consistencia blanda a moderadamente firme, de baja plasticidad y con intercalaciones de arena. El nivel freático varió entre 1.2m a 2.1m (4 pies a 7 pies) por debajo de la superficie de terreno.

Figura 6.
Marco de Reacción Idealizado



6.2 CONDICIONES DE CARGA DE ZAPATA

Cuando las cargas laterales fueron aplicadas al marco de reacción, los miembros inclinados transmitieron fuerzas verticales y horizontales a las zapatas. Cuando se aplicó la carga al puente por el marco en la dirección mostrada en la Figura 6, ambas zapatas fueron sujetas a cargas laterales. La zapata A fue también sujeta a cargas en compresión mientras que la zapata B fue sujeta a cargas en tensión. La geometría del marco resultó en una razón de carga vertical aplicada a carga horizontal aplicada de 1.25. La carga muerta del marco de reacción y la carga muerta de cada zapata resultaron en una carga neta de 445kN (100 kips) en cada zapata. La Tabla 2 presenta la carga vertical total actuante en cada una de las zapatas de reacción a diferentes incrementos de carga horizontal aplicada.

Mientras la carga horizontal aplicada incrementa, la carga a compresión en la zapata A también incrementa. De igual manera, la zapata B fue sujeta a un incremento de carga a tensión. Cuando la fuerza a tensión aplicada a la zapata B fue mayor que la carga muerta actuante en la zapata, la zapata dejó de aplicar esfuerzo de compresión al suelo subrasante y a los elementos Geopier, y a su vez, no se desarrolló resistencia a carga lateral. Sin embargo, la resistencia a carga lateral se continuó desarrollando en la zapata A. El factor de seguridad contra deslizamiento, calculado con las ecuaciones 1 y 7, también es presentado en la Tabla 2.

Tabla 2.
Factores de Seguridad Correspondientes a
Cargas Laterales en Incremeto

CARGA HORIZONTAL kN (KIPS)	CARGA A COMPRESIÓN ZAPATA A, kN (KIPS)	CARGA A COMPRESIÓN ZAPATA B*, kN (KIPS)	FACTOR DE DEGURIDAD CONTRA DESLIZAMIENTO
0 [0]	445 [100]	445 [100]	--
178 [40]	667 [150]	222 [50]	4.17
356 [80]	890 [200]	0 [0]	2.78
534 [120]	1112 [250]	0* [0]	2.32
890 [200]	1557 [350]	0* [0]	1.95
1780 [400]	2669 [600]	0* [0]	1.67

*Indica fuerza a tensión neta en zapata. Como resultado, no hay resistencia lateral aportada por la zapata.

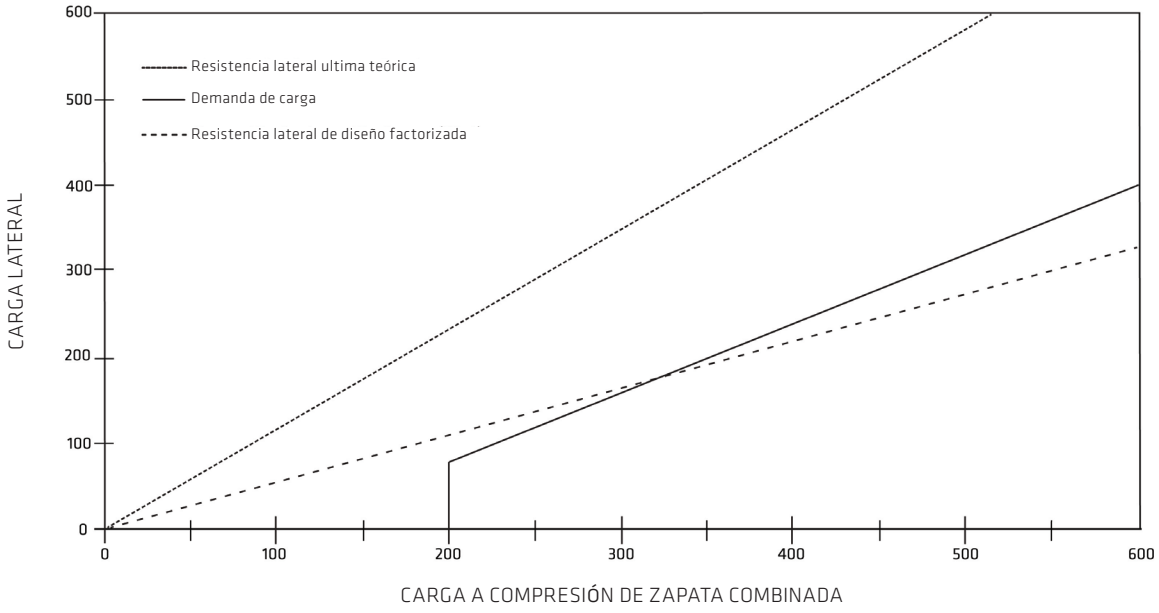
6.3 RESULTADOS DE PRUEBA

Durante la prueba, una carga máxima horizontal de 1,799kN (400 kips) fue aplicada al apoyo del puente. En el máximo valor de carga lateral, la zapata A fue sujeta a una carga vertical de 2,669 kN (600 kips) y la zapata B fue sujeta a una carga a tensión de 1,779kN (400 kips) que fue resistida por los anclajes de tensión. El sistema de zapatas combinado fue sujeto a una carga vertical neta de 2,669 kN (600 kips) disponible para el desarrollo de la resistencia de carga lateral.

La Figura 7 presenta un gráfico del desarrollo del sistema de cargas a compresión como resultado de la carga lateral aplicada. La figura 7 también presenta envolventes de la resistencia teórica a las cargas laterales últimas y de la resistencia permisible a cargas laterales (con un factor de seguridad de 2). Los resultados de la investigación presentados en la Figura 7 indican que la resistencia lateral aportada por el sistema soportado por Geopier es mayor que la resistencia a la carga lateral de diseño factorizada.

Figure 7.

Demanda de carga lateral en marco de reacción



Nota: La figura ignora la resistencia a carga lateral adicional aportada por los anclajes de acero en tensión

7. RESUMEN

Las cimentaciones superficiales soportadas por elementos Geopier proveen resistencia a cargas laterales usando mecanismos idénticos a aquellos de las zapatas superficiales convencionales. Las cargas laterales son resistidas por empujes pasivos en la cara de la zapata y por resistencia a deslizamiento en la base de la zapata. El uso de elementos Geopier incrementa la resistencia a cargas laterales aumentando la resistencia a deslizamiento disponible en la base de la zapata. La resistencia a deslizamiento es incrementada debido a la concentración de esfuerzos en el tope de los elementos Geopier, a la alta resistencia al cortante (ángulo de fricción interna), y al comportamiento de dilatación del agregado Geopier compactado.

AUTORES

Kord J. Wissmann, Ph.D., P.E.

Brendan T. FitzPatrick, P.E.

Evert Lawton, Ph.D., P.E.

REFERENCIAS

Fox, N.S. and M.J. Cowell (1998). “Geopier® Soil Reinforcement Manual, Geopier Foundation Company, Inc. 8283 North Hayden Road, Suite 291, Scottsdale, AZ.

Lawton, E. C. (2000). “Performance of Geopier Foundations During Simulated Seismic Tests at South Temple Bridge on Interstate 15, Salt Lake City, UT." Final Report, No. UUCVEEN 00-03, University of Utah, Salt Lake City, UT.

Lawton, E. C. and N. S. Fox. (1994). “Settlement of Structures Supported on Marginal or Inadequate Soils Stiffened with Short Aggregate Piers.” Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, A.T. Yeung and G.Y. Fello (Editors), American Society of Civil Engineers, 2, 962-74.

Lawton, E.C., Fox, N. S., and R. L. Handy. (1994). “Control of Settlement and Uplift of Structures Using Short Aggregate Piers.” In-situ Deep Soil Improvement, K.M. Rollins (Editor), American Society of Civil Engineers, 121-132.

Terzaghi, K. and R.B. Peck. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY.

White, D.J. (2001). Personal Communication. September 13, 2001.

Wissmann, K.J. and N.S. Fox. (2000). "Design and Analysis of Short Aggregate Piers to Reinforce Soils for Foundation Soils." Proceedings, Geotechnical Colloquium, Technical University Darmstadt, Darmstadt, Germany, March 25, 2000.

Wissmann, K.J. and N.S. Fox, and J.P. Martin. (2000). "Rammed Aggregate Piers Defeat 75-Foot Long Driven Piles." ASCE Proceedings, Performance Confirmation of Constructed Geotehcnical Facilities, University of Massachusetts, Amherst, MA, April 9-12, 2000.

SÍMBOLOS UTILIZADOS

A = Área total de Zapata

A_g = Área de Zapata soportada por elementos Geopier

A_s = Área de zapata soportada por el suelo matriz

B = Ancho de zapata

c_m = Cohesión del suelo matriz

D_f = Profundidad de desplante de zapata

F_{all} = Resistencia al deslizamiento permisible desarrollada por los elementos Geopier

f_{all} = Coeficiente de fricción unitario compuesto permisible

F_g = Resistencia al deslizamiento del suelo matriz

F_p = Fuerza lateral pasiva

F_t = Resistencia total al deslizamiento a lo largo de la base de la zapata

FS = Factor de seguridad

ϕ'_g = Ángulo de fricción interna del elemento Geopier

ϕ'_m = Ángulo de fricción interna de la matriz de suelo

γ = Peso unitario del suelo matriz adyacente a la zapata

K_p = Coeficiente de empuje pasivo de Rankine

P = Carga muerta aplicada a la zapata

q = Presión promedio ejercida por la zapata

q_g = Esfuerzo normal sobre el elemento Geopier

q_s = Esfuerzo normal sobre el suelo matriz

R_s = Relación de rigidez relativa entre el elemento Geopier y el suelo matriz

R_a = Razón del área transversal de los elementos Geopier y el área total de la zapata

REFUERZO Y MEJORAMIENTO DE SUELOS CON LOS SISTEMAS GEOPIER®

Trabaje con nuestros ingenieros alrededor del mundo para resolver sus retos de refuerzo y mejoramiento de suelos. Para más informacion, llame al 800-371-7470, correo electrónico info@geopier.com, o visite geopier.com.

130 Harbour Place Drive, Suite 280, Davidson, NC 28036
800.371.7470 | info@geopier.com | marketing@geopier.com
www.geopier.com

©2017 Geopier Foundation Company, Inc. La tecnología Geopier® y las marcas de fábrica están protegidas bajo patentes de los EUA y marcas de fábrica listadas en www.geopier.com/patents y otras aplicaciones de marca y patentes pendientes. Existen otras patentes extranjeras, aplicaciones de patentes, marcas registradas y marcas de fábrica.

GEOPIER_TB_11_01.17